

中图法分类号: TP391.41 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)05-0857-08

论文索引信息: 赵军, 高满屯, 王三民. 多面体线框模型的表面识别技术 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(5): 857-864

多面体线框模型的表面识别技术

赵军, 高满屯, 王三民

(西北工业大学机电学院, 西安 710072)

摘要: 提出一种综合利用线框模型几何信息和拓扑信息的表面识别算法。首先利用平行投影法将 3 维线框模型投影到 2 维平面上, 隐藏被遮挡边和悬边悬链; 然后在可见投影边线图中, 根据各个顶点的关联边序列, 按照顺时针最小转角原则搜索最小回路; 最后根据 Moebius 规则和二流形体的性质, 及时删除不是表面投影的非法回路和图中的完备边, 并调整回路的方向, 使其均指向体外。通过各类典型立体的表面识别实验表明, 算法具有广泛的立体适应能力和较高的效率。

关键词: 线框模型; 表面识别; 投影; 回路

Identifying faces of polyhedral wireframe models

Zhao Jun, Gao Mantun, Wang Sanmin

(School of Mechatronics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072 China)

Abstract: This paper presents an efficient algorithm for extracting faces from polyhedral wireframe models. The main features of the algorithm are using the topological and geometric information of wireframe models and its stronger adaptability. First, the wireframe model is projected to a plane, and the "invisible" edges which are obstructed by another edge in projection are hidden. And the edges which have a common vertex are arranged into a set in counterclockwise. Then search the minimal circle based on rule of the smallest rotation angle in clockwise. At the same time the Moebius rule are use to delete the illegal circle and remove the finished edges which are accurately contained by two circles. When a "visible" edge is removed, "invisible" edges blocked by it may be "visible" ones. So the new minimal circle can be searched. Repeat this course until all edge is removed and there are no illegal circle and illegal edge. Finally, the remaining circle are all true face of the model and all point to outside of the object by adjusting their direction. Several typical examples are given to demonstrate the widespread adaptability and high efficiency of the algorithm.

Keywords: wireframe models; face identification; projection; circle

0 引言

随着计算机视觉和图像识别研究的发展, 基于图像或者工程图进行物体的 3 维重构成为了一个重要的研究领域, 在重构过程中往往线框模型会被直接重建出来。Chu 等人^[1]基于解释线图从单幅线图

得到了平面立体的线框模型。Cicek^[2]从 2 维多面投影图恢复了物体的 3 维线框模型。张爱军等人^[3]从三视图恢复出了线框模型。由于仅包含顶点和棱线信息的线框模型对物体表示存在二义性, 需将线框模型再转换为面模型或实体模型。Markowsky 和 Wesley^[4]利用线框模型的拓扑信息构造棱线回路, 得到多面体线框模型的表面。Courter 等人^[5]基于

收稿日期: 2010-03-11; 修回日期: 2010-06-11

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50875210)。

第一作者简介: 赵军 (1975—), 男, 副教授。西北工业大学机械设计及理论专业博士研究生, 主要研究方向为计算机视觉与模式识别。E-mail: zhaojun@mail.lzjtu.cn。

线框模型中的基本回路,转化出模型的表面。Hanrahan^[6]提出了平面立体线框图提取的方法,但局限于所有顶点的度数为 3。Agarwal 等人^[7]提出了基于四面体分解的方法,得到平面立体线框模型的表面,但要求立体不能含有孔洞。Liu 等人^[8-9]利用最大权团理论和遗传算法对单幅线图进行面识别,由于对回路限制较少,参与运算的回路数目较多,算法时间复杂度较大。Liu 等人^[10-11], Gong^[12]从三视图首先恢复出线框模型,然后结合线框模型从三视图中搜索回路决策识别表面。

本文的主要目的是找出既能提高运算效率同时又具有广泛适应形体域,并具有一定通用性的平面体线框模型表面识别算法。为此本文提出利用平行投影法将线框模型投影到平面上,然后利用投影图“可见”线段中存在的回路来识别立体表面的方法。投影图继承了 3 维线框模型的点线拓扑关系,并压缩了其几何信息,既方便了最小回路的搜索又减少了计算量,只搜索数目有限的最小回路也节省了大量的搜索和决策工作。

1 相关的定义与理论

定义 1 平面体的棱线在投影图中的投影称为边。

定义 2 投影图的封闭最外轮廓线框称为其外围回路,文中外围回路均设定为逆时针方向。投影图的方向与外围回路的方向满足右手螺旋定则。

定义 3 投影图中若一个回路内不包含与其共边的其他回路,且其方向与投影图方向满足右手螺旋定则,则称其为最小回路。

定义 4 有公共顶点的两条边称为关联边,公共顶点称为它们的关联顶点;与顶点 v_i 关联的所有边的条数,称为顶点 v_i 的度,记为 $d_{eg}(v_i)$ 。

定义 5 冲突边:被超过两个以上最小回路包含的边。

定义 6 完备边:恰被两个回路同时包含的边。

Moebius 规则 对于一个流形物体,每一个边属于且仅属于两个表面,且在这两个表面中方向相反。

1.1 投影与遮挡

空间点的 3 维坐标可采用投影的方法将其转换为平面上 2 维坐标。构造平行正投影转换模型如图 1 所示, AO 为投影线方向, A 在 XOY 面上的投影

为 a , OA 与 Z 轴正向的夹角为 φ , 其投影 aO 与 X 轴正向的夹角为 θ 。投影面 P 过 O 点, 并垂直于 OA 。 Z 轴在 P 上的投影为 Y' 轴, 在 P 上可建立右手坐标系 $X'OY'$ 。空间点 $M(x, y, z)$ 与 P 平面上投影 $m(x', y')$ 的坐标转化方程为

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ -\cos\theta\cos\varphi & -\sin\theta\cos\varphi & \sin\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (1)$$

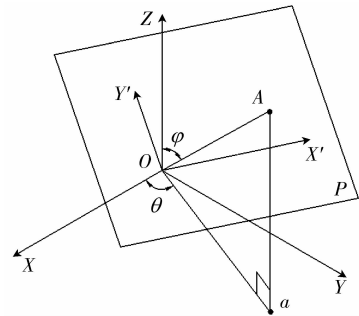


图 1 投影转化模型

Fig. 1 The model of projective transformation

投影面 P 在原空间坐标系中法向量 $\mathbf{n} = \{\cos\theta\cos\varphi, \sin\theta\cos\varphi, \sin\varphi\}$ 。空间一点 $M(x, y, z)$ 到该投影面 P 的有向距离 D 可由下式得到

$$D = x\cos\theta\cos\varphi + y\sin\theta\cos\varphi + z\sin\varphi \quad (2)$$

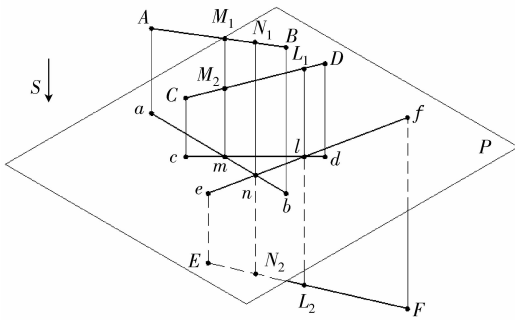
式中,若 D 为负,则表示空间点在投影面 P 的另一侧。

图 2(a) 中, 线段 AB 在 P 平面上的投影为 ab , AB 上一点 M_1 的投影为 m , 可以推得 M_1 点到 P 的距离为

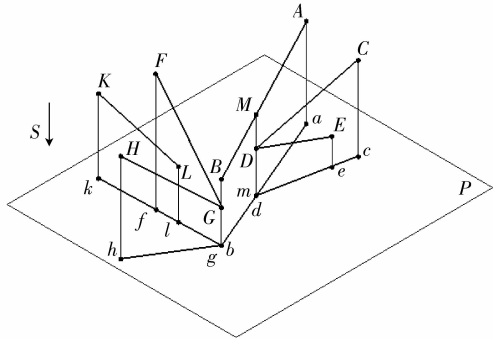
$$D_{M_1} = (|bm| \times D_A + |am| \times D_B) / |ab| \quad (3)$$

式中, $|ab|$ 、 $|am|$ 、 $|bm|$ 均表示该线段的长度, D_A 、 D_B 为根据式 (2) 所得 A 、 B 两点到投影面的有向距离。图 2(a) 中线段 AB 与线段 CD 在 P 投影面上有一对点 M_1 和 M_2 的投影重合在 m 处, $D_{M_1} > D_{M_2}$ 则在本文中称 AB 遮挡 CD , 同理图中 AB 遮挡 EF , CD 遮挡 EF 。如果一条棱线在投影过程中遮挡了一个顶点, 则与该顶点关联的棱线均认为被遮挡。如图 2(b) 中, AB 遮挡 CD 、 DE 、 FG 和 GH 。

在投影图中, 相交不共线的边对应的线框模型棱线在投影过程中存在遮挡, 求出投影图中的交点后按式 (2) 计算重影点到投影面的有向距离, 确定遮挡关系。对于投影图中共线且部分重合或完全重合的两条边, 有两种情况, 其一为关联于同一端点的



(a) 情形 1



(b) 情形 2

图 2 投影的遮挡及可见性

Fig. 2 The obstruction of projection and visibility

两条边,它们投影重合,文中规定为互不遮挡,如图 2(b)中的 CD 与 DE ;其二为不同边投影重合,任取一重合端点作为交点,确定遮挡关系,如图 2(b)中 FG 遮挡 KL 。

1.2 模型的数学表示

对于已知各个顶点和棱线拓扑关系的线框模型,用 $V = \{v_i \mid v_i = (x_i, y_i, z_i), 1 \leq i \leq n\}$ 表示其各个顶点, n 为总的顶点个数; $E = \{e_j \mid e_j = (v_s, v_t), 1 \leq j \leq m, 1 \leq s \leq n, 1 \leq t \leq n\}$ 表示其各条边线, m 为总的边数。引入一个连接矩阵 $X_{n \times n}$ 表示线框模型各个顶点的拓扑连接关系,引入遮挡矩阵 $R_{m \times m}$ 表示在投影图中各边之间的遮挡。 $X_{n \times n}$ 为对称方阵, $R_{m \times m}$ 为非对称方阵。

$$X_{n \times n}(i, j) = \begin{cases} 0 & v_i \text{ 与 } v_j \text{ 之间无拓扑连线} \\ 1 & v_i \text{ 与 } v_j \text{ 之间有拓扑连线} \end{cases}$$

$$R_{m \times m}(i, j) = \begin{cases} 0 & e_i \text{ 遮挡 } e_j \\ 1 & e_i \text{ 不遮挡 } e_j \end{cases}$$

投影后各顶点之间的拓扑连接关系不变,因此 $X_{n \times n}$ 也表示了投影图中各顶点之间的拓扑连接关系。

1.3 顶点关联边序列

在平面 P 中, s 条边 e_1, e_2, \dots, e_s 具有公共顶点 M , 如图 3 所示。平面 P 的法向量为 n , X 轴正向为平面中定义的 0° 方向, $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_s$ 为从 X 方向绕法矢 n 逆时针转到边 e_1, e_2, \dots, e_s 的转角。 M 的关联边序列即是将关联于 M 的各条边按转角 α 从小到大排列,记为 $CElist_M$ 。如图 3 中 M 点的关联边序列为 $CElist_M = \{e_1, e_2, e_3, \dots, e_s\}$ 。文中用 $Pre_CElist_M(e_i)$ 来表示 M 点关联边序列中 e_i 的前一个元素;用 $Next_CElist_M(e_i)$ 来表示 M 点关联边序列中 e_i 的后一个元素。并且约定:关联边序列中第一个元素的前一个元素为该序列的最后一个元素;最后一个元素的后一个元素为该序列的第一个元素。如图 3 中 $e_2 = Pre_CElist_M(e_3), e_1 = Next_CElist_M(e_s)$ 。

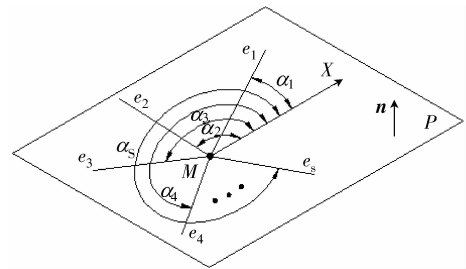


图 3 共点边序列

Fig. 3 The set of edges linking at same point

1.4 搜索最小回路

Qing^[13] 和 Liu^[11] 曾提出过利用转角在投影图中搜索回路的方法,但要求搜索的起始点为一个凸顶点,起始边为一凸边,这些限制影响了回路搜索的效率。本文利用回路方向后验证的方法对基于转角的回路搜索进行了改进,消除回路搜索的初始要求。

用 $CirV$ 按序存储搜索到最小回路的顶点, $CirE$ 按序存储搜索到最小回路的边。在一个图中若 $d_{eg}(v_i) \geq 2, 1 \leq i \leq n$, 且已求得 $CElist_v_i$, 搜索一个最小回路的方法为:从投影图外围回路中的一个顶点 v_s 出发沿与其关联的一条边 e_s 往前搜索,此时 $CirV = \{v_s\}, CirE = \{e_s\}$ 。当搜索沿着最小回路中第 $j (j=1, 2, \dots)$ 条边 e_j 到达回路第 $j+1$ 个顶点 v_k 时 ($CirV = \{v_s, \dots, v_k\}, CirE = \{e_s, \dots, e_j\}$), 第 $j+1$ 条边 e_i 的选择遵循顺时针最小转角原则(在所有关联于 v_k 的边中, e_i 是沿顺时针方向与 e_j 夹角最小的边), 也就是 $e_i = Pre_CElist_v_k(e_j)$, 依次搜索直到回到起始点 v_s 。若得到的回路是逆时针方向的, 则是

一个最小回路。如图 4 中从 v_1 点出发沿着边 e_1 往前搜索, 到达 v_2 点, 在 v_2 点的共点边序列 $CElist_v_2 = \{e_5, e_1, e_2\}$ 中, 因为 $e_5 = Pre_CElist_v_2(e_1)$, 则 e_5 为搜索到的第 2 条边, 沿着 e_5 搜索到达 v_4 点。又因为 $e_8 = Pre_CElist_v_4(e_5)$, 沿着 e_8 搜索到达 v_7 点。依次通过 e_9 到达 v_1 点得到回路 $CirV = \{v_1, v_2, v_4, v_7\}$, $CirE = \{e_1, e_5, e_8, e_9\}$, 回路为逆时针方向, 因此是最小回路; 如果从 v_5 点沿 e_4 出发, 则可得到最小回路 $CirV = \{v_5, v_4, v_2, v_3\}$, $CirE = \{e_4, e_5, e_2, e_3\}$ 。如果从 v_5 点沿 e_3 出发, 则可得到回路 $CirV = \{v_5, v_3, v_2, v_1, v_7, v_6\}$, $CirE = \{e_3, e_2, e_1, e_9, e_7, e_6\}$, 该回路为顺时针方向, 不是最小回路。

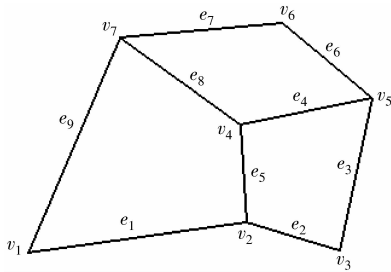


图 4 搜索最小回路

Fig. 4 Searching minimum circle

2 线框模型表面识别算法

不同于传统的基于拓扑信息或基于几何信息的表面提取方法, 本文算法在表面提取过程中, 首先根据投影原理, 将 3 维顶点坐标投影到 2 维平面上, 在投影过程中顶点间连线的拓扑关系不变。其次确定投影图中存在遮挡关系的边以及它们间的遮挡关系, 并隐藏被遮挡的边, 对可见边组成的图搜索最小回路。而后根据 Moebius 规则删除完备边和释放包含冲突边的最小回路, 更新投影图后再搜索最小回路, 直至投影图中所有的边都被删除, 最终获得一个回路集合, 所包含的回路使线框模型所有的边都成了完备边, 且不包含冲突边, 每个回路都表示一个真实表面, 通过调整回路方向使其均指向立体外侧。在最小回路的搜索过程中, 会产生一些重复回路, 以及不表示模型真实表面的非法回路, 在搜索过程中将被及时判断并消除。算法的主要步骤如下:

1) 检查, 准备数据

该步骤主要是为了核实已知模型数据的完整性和对数据的初始化准备。假定待处理的线框模型有

n 个顶点 m 条棱线, 首先检查每个顶点, 判断是否有 $d_{eg}(v_i) < 3$ ($1 \leq i \leq n$) 的顶点, 如果有则该线框模型不能表示一个流形体; 然后生成顶点集 $V = \{v_i | v_i = (x_i, y_i, z_i), 1 \leq i \leq n\}$ 和边集 $E = \{e_j | e_j = (v_s, v_t), 1 \leq j \leq m, 1 \leq s \leq n, 1 \leq t \leq n\}$, 根据拓扑关系生成连接矩阵 $X_{n \times n}$ 。

2) 模型投影

将线框模型向平面投影的主要目的是为了便于寻找最小回路——潜在的表面回路。投影时要避免棱线投影积聚为点, 投射方向以 $\theta = \pi/4$ 和 $\varphi = \pi/5$ 为初始值, 若该方向平行于某条线框模型的棱线, 则 θ 和 φ 交替以 $\pi/60$ 递增, 直到投射方向不平行于线框模型的任意一条棱线。利用式(1), 将线框模型 3 维顶点坐标 $V_i(x, y, z)$ 投影到 2 维平面上得到 2 维坐标 $v_i(x', y')$, 联合连接矩阵 $X_{n \times n}$ 确定 2 维投影图。

3) 判断遮挡

为了保证搜索到顺着投影方向可见的最小回路, 需要将投影图中的被遮挡图线进行隐藏。为此首先检查投影图中各边的分离、相交和重叠情况, 找出存在遮挡的边对, 然后根据式(2)(3)判断它们的遮挡情况, 生成初始遮挡矩阵 $R_{m \times m}$ 。更新连接矩阵 $X_{n \times n}$ 以隐藏图中的被遮挡边。如第 g 条边遮挡了第 f 条边, 即 $R(g, f) = 0$, 根据边集 E 得到 $e_f = (v_i, v_j)$, 则令 $X(i, j) = 0, X(j, i) = 0$ 。在判断存在遮挡边对的过程中, 可以先利用各边的外包围矩形盒之间的相对位置排除大部分不存在遮挡的情况(两条边分离), 以减少计算量。

4) 搜索悬边和悬链

关联顶点度数 $d_{eg}(v_i) = 1$ 的边称为悬边。从悬边度数为 1 的顶点出发搜索, 直到遇到度数大于 2 的顶点, 其间经过的路径称为悬链。为了避免搜索到只包含一条边或者不封闭的假回路, 搜索图中所有的悬边和悬链, 更新连接矩阵将其隐藏。然后生成此时图中各顶点的共点边序列阵 $CElist$ 。

检查若连接矩阵 $X_{n \times n}$ 为全 0 矩阵, 先恢复本轮次找到的悬边和悬链, 统计此时图中所有 $d_{eg}(v_i) = 1$ 的顶点, 在 $Circle$ 阵中找到包含这些点个数最多的回路, 将该回路从 $Circle$ 中删除, 并在图中恢复该回路各条边, 重新执行该步骤。

5) 搜索投影图的外围回路

为了保证在后续最小回路中搜索到逆时针方向的回路, 先找出投影图的外围回路。在经过隐藏遮挡边和悬边悬链的投影图中, 找到投影图的 y' 坐标

极小值点——最低点 v_{\min} , 从 v_{\min} 开始沿着其关联边序列 $CElist_v_{\min}$ 中第 1 个元素 e_s 搜索, e_s 的另一个顶点 v_k 作为外围回路的第 2 个顶点, 下一条回路边 e_i 按照逆时针最小转角原则来选择 (在所有关联于 v_k 的边中, e_i 是沿逆时针方向与 e_s 夹角最小的边), 也就是 $e_i = Next_CElist_v_k(e_s)$, 依次搜索直到搜索到起始点 v_{\min} , 可得到逆时针方向的外围回路 **BoundCir**。如图 4 其外围回路 $BoundCir = \{ v_1 e_1 v_2 e_2 v_3 e_3 v_5 e_6 v_6 e_7 v_7 e_9 \}$ 。若搜索到的外围回路中所有顶点度数都为 2, 则将外围回路作为一个最小回路存入 **Circle** 中, 并转第 7) 步。

6) 搜索最小回路

分别从第 5) 步中搜索到的外围回路 **BoundCir** 中度数大于 2 的顶点出发, 沿着各自在 **BoundCir** 中的后继边按照顺时针最小转角原则搜索, 所得的均为最小回路, 存储在 **Circle** 阵中。最后检查 **Circle**, 删除其中重复的回路。

统计 **Circle** 中存在的冲突边, 并删除包含冲突边最多的回路, 如果存在多个回路包含最多冲突边数相等, 删除边数最多的回路, 直至没有冲突边存在。这基于以下两个事实^[14]:

- (1) 当一个回路是立体的真实表面时, 它具有与其他回路最少数目的公共边;
- (2) 当所有回路的边数之和最小时, 这些回路是立体的真实表面。

7) 删除完备边

检查 **Circle** 中的各个回路, 删除其中的完备边, 并更新遮挡矩阵 $R_{m \times m}$ 和连接矩阵 $X_{n \times n}$ 。返回第 4) 步, 直至删除完投影图中所有的边, 至此回路搜索结束。此时的数据特征为连接矩阵 $X_{n \times n}$, 为 0 矩阵, 而遮挡矩阵 $R_{m \times m}$ 为全 1 矩阵。

8) 回路方向调整

从 **Circle** 中找出两个回路 $minCir_i$ 和 $minCir_j$, 它们均包含第一轮搜索到的外围回路 **BoundCir** 中第一条边 $e_s = (v_m, v_n)$ (v_m 为当时最低点), 从其中任意一个回路中取出 v_n 的下一顶点 v_c , 过其对应的 3 维顶点 V_c 作一条平行于投影方向的直线 L , 求出 L 与另一个回路所确定平面的交点 C , 比较 V_c 与 C 到投影面 P 的距离 D_{V_c} 与 D_C , 距离较大的点所在的回路 (假设为 $minCir_i$) 称为种子回路, 其方向仍保持逆时针方向。根据 Moebius 规则, 与 $minCir_i$ 具有公共边 e_s 的回路 $minCir_j$ 中, e_s 应该具有相反的方向, 据此调整 $minCir_j$ 的方向。照此根据深度优先的搜

索原则利用公共边可确定所有回路的方向, 使其均指向立体外侧。对种子回路保持逆时针方向, 以下给出证明:

证明 由于 $minCir_i$ 和 $minCir_j$ 的公共边 e_s 一个端点 v_m 为初始投影图中的最低点, 且它是投影图的一条最外轮廓边, 因此 $minCir_i$ 和 $minCir_j$ 所在的两个表面, 顺着投影方向看都在 e_s 同侧的两个半平面 P_1, P_2 内, 如图 5 所示, 直线 L 与这两个平面的交点 V_c 和 C 到投影面 P 的有向距离反映了顺着投影方向看这两个平面的前后顺序, 距离大者在后, 是立体的一个前表面, 其法向量指向前侧, 对应的回路方向要与其符合右手螺旋定则应为逆时针方向。而算法中搜索到的所有最小回路的初始方向均为逆时针方向, 因此种子回路的方向保持不变, 证毕。

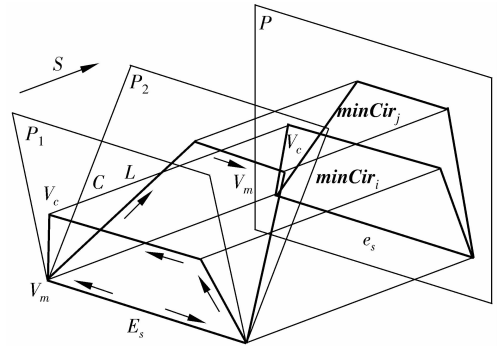


图 5 确定种子回路的方向

Fig. 5 Define the seed circle's direction

下面对第 6) 步中找到的回路是最小回路给出证明:

证明 根据定义 2 中的假设, 逆时针方向的外围轮廓线框给外围回路 **BoundCir** 中各边确定了一个方向, 沿着该方向走, 则 **BoundCir** 围成的区域总在左手侧。第 6) 步中找到的回路 (且称为 **SubCir**) 至少包含一条 **BoundCir** 中的边, 并继承了该边的方向, 而 **SubCir** 围成的区域是 **BoundCir** 围成区域的一部分, 因而 **SubCir** 围成的区域也在该边的左手侧。因此, **SubCir** 为逆时针方向, 是一个最小回路, 证毕。

注: 第 5) 步所得的外围回路中所有边顺次连接而成的线框并不一定包围图中所有线条, 因为经过若干轮最小回路搜索和完备边删除后可能会使原来的投影图变成一个不连通图。但这不影响后续的处理。另外会存在极端情况, 前一轮释放的包含冲突边的最小回路在下轮又被搜索到, 反复循环致使

算法不收敛。对此种情况改变投射方向角,将 θ 或者 φ 加 $\pi/2$ 重新执行算法。

处理含有孔洞的立体,需要在最后增加一个步骤:确定回路的嵌套。根据 *Circle* 中各个最小回路所确定的平面方程判断是否有相同的平面,若有则意味着有相同的回路共平面。对共平面的回路通过判断回路的嵌套关系确定表面。如果两个共面最小回路没有嵌套关系,那么它们均为立体的真实表面;如果两个最小回路存在嵌套,则内回路所围成的区域为空洞,而内外回路之间的区域为真实表面。如果存在多个最小回路层层嵌套,则由外向内给回路编号,序号为奇数的回路到序号为偶数的回路之间区域为真实表面,其余为空。对于存在空洞的表面其边界呈环状,具有内外环,其内环所呈现的时针方向与外环相反。

3 算例与分析

对图 6(a) 所示线框模型进行表面识别。选择以 $\theta = \pi/4$ 和 $\varphi = \pi/5$ 的投射方向投影后如图 6(b) 所示,隐藏被遮挡边和悬边后如图 6(c) 所示,其外围回路 $BoundCir = \{e_8, e_{16}, e_{15}, e_{14}, e_{13}, e_5, e_4, e_9, e_{32},$

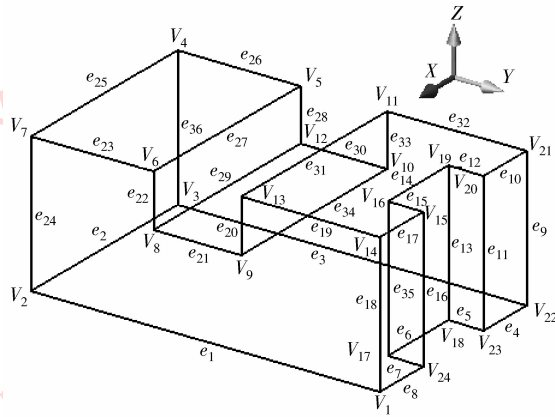
$e_{31}, e_{20}, e_{21}, e_{29}, e_{28}, e_{26}, e_{25}, e_{24}, e_1\}$, 度数大于 2 的顶点有 $v_1, v_{15}, v_{19}, v_{23}, v_{21}, v_{13}, v_8, v_5, v_7$ 。分别从这 9 个点出发搜索并合并重复回路得到 7 个最小回路

- $minCir_1 = \{e_8, e_{16}, e_{17}, e_{18}\}$
- $minCir_2 = \{e_{15}, e_{14}, e_{12}, e_{10}, e_{32}, e_{31}, e_{19}, e_{17}\}$
- $minCir_3 = \{e_{13}, e_5, e_{11}, e_{12}\}$
- $minCir_4 = \{e_4, e_9, e_{10}, e_{11}\}$
- $minCir_5 = \{e_{20}, e_{21}, e_{22}, e_{23}, e_{24}, e_1, e_{18}, e_{19}\}$
- $minCir_6 = \{e_{29}, e_{28}, e_{27}, e_{22}\}$
- $minCir_7 = \{e_{26}, e_{25}, e_{23}, e_{27}\}$

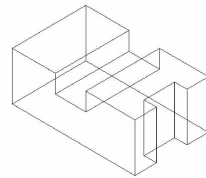
删除完备边 $e_{17}, e_{12}, e_{11}, e_{10}, e_{22}, e_{23}, e_{27}, e_{19}, e_{18}$ 后,再次隐藏被遮挡边和悬边后投影图如图 6(d) 所示,它具有和上轮搜索相同的外围回路,度数大于 2 的顶点有 $v_{24}, v_{16}, v_{11}, v_9, v_4, v_2$ 。分别从这 6 个点出发,经过第 2 轮最小回路搜索并合并重复回路得到以下 4 个最小回路

- $minCir_8 = \{e_7, e_{35}, e_{14}, e_{13}, e_5, e_4, e_9, e_{32}, e_{33}, e_{34}, e_{21}, e_{29}, e_{28}, e_{26}, e_{36}, e_2, e_1, e_8\}$
- $minCir_9 = \{e_{35}, e_7, e_{16}, e_{15}\}$
- $minCir_{10} = \{e_{34}, e_{33}, e_{31}, e_{20}\}$
- $minCir_{11} = \{e_2, e_{36}, e_{25}, e_{24}\}$

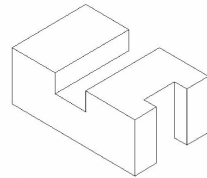
删除完备边 $e_{31}, e_{20}, e_{16}, e_{15}, e_7, e_{35}, e_{14}, e_{13}, e_5, e_4,$



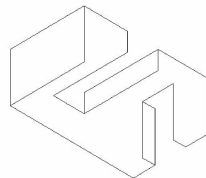
(a) 线框模型



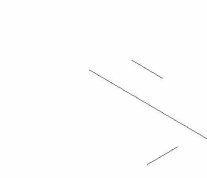
(b) 投影图



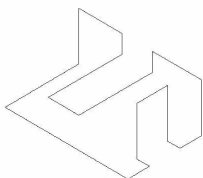
(c) 隐藏被遮挡边和悬边



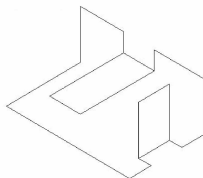
(d) 第 1 轮删除完备边后



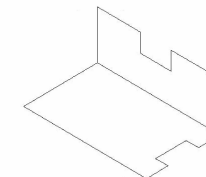
(e) 第 2 轮删除完备边后



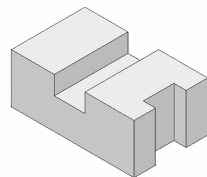
(f) 释放的回路



(g) 释放回路后



(h) 第 3 轮删除完备边后



(i) 面模型

图 6 算例 1

Fig. 6 Example 1

$e_9, e_{32}, e_{33}, e_{34}, e_{21}, e_{29}, e_{28}, e_{26}, e_{36}, e_2, e_1, e_8$ 后,投影图如图6(e)所示,此时图中只剩3条悬边 e_6, e_3, e_{30} ,共有6个度数为1的顶点 $v_{17}, v_{18}, v_{22}, v_3, v_{10}, v_{12}$ 。包含这些顶点最多的已找出的最小回路为 $minCir_8$ (图6(f)),释放该回路并隐藏被遮挡边后投影图如图6(g)所示。经过第3轮搜索又可得到3个最小回路

$$minCir_{12} = \{e_7, e_{35}, e_{14}, e_{13}, e_5, e_4, e_9, e_{32}, e_{33}, e_{34}, e_{21}, e_{29}, e_{28}, e_{26}, e_{36}, e_2, e_1, e_8\}$$

$$minCir_{13} = \{e_{13}, e_{14}, e_{35}, e_6\}$$

$$minCir_{14} = \{e_{29}, e_{21}, e_{34}, e_{30}\}$$

此时在Circle所有回路中存在6条冲突边 $e_{35}, e_{14}, e_{13}, e_{34}, e_{21}, e_{29}$ 找到包含这些边最多的回路 $minCir_{12}$,释放该回路后Circle已无冲突边,删除完备边 $e_{35}, e_{14}, e_{13}, e_{34}, e_{21}, e_{29}$ 后投影图如图6(h)所示。经过第4轮搜索得到2个最小回路

$$minCir_{15} = \{e_3, e_2, e_1, e_8, e_7, e_6, e_5, e_4\}$$

$$minCir_{16} = \{e_3, e_9, e_{32}, e_{33}, e_{30}, e_{28}, e_{26}, e_{36}\}$$

至此所有最小回路中没有冲突边存在,并且连接矩阵 $X_{n \times n}$ 全为0,遮挡矩阵 $R_{m \times m}$ 全为1,所有的回路没有嵌套情况, $Circle = \{minCir_1; minCir_2; minCir_3; minCir_4; minCir_5; minCir_6; minCir_7; minCir_8; minCir_9; minCir_{10}; minCir_{11}; minCir_{13}; minCir_{14}; minCir_{15}; minCir_{16}\}$ 阵中14个回路都是立体真实的表面。

找出包含边 e_8 的两个最小回路 $minCir_1$ 和 $minCir_{15}$,根据平行于投影方向的直线与这两个回路所在半平面的交点到投影面的距离,可确定 $minCir_1$ 为种子回路仍保持逆时针方向,根据 e_8 的方向 $minCir_{15}$ 调整为顺时针方向。进而 $minCir_{15}$ 与 $minCir_{16}$ 具有公共边 e_3, e_3 在 $minCir_{15}$ 中的方向为从 v_3 到 v_{22} ,因此 e_3 在 $minCir_{16}$ 中的方向为 v_{22} 到 v_3 ,据此将 $minCir_{16}$ 的方向调整为顺时针方向。依次确定所有回路的方向,逆时针方向的回路有 $minCir_1, minCir_2, minCir_3, minCir_4, minCir_5, minCir_6, minCir_7, minCir_{13}$ 和 $minCir_{14}$,顺时针方向的回路包括 $minCir_9, minCir_{10}, minCir_{11}, minCir_{15}$ 和 $minCir_{16}$ 。最后各个表面渲染结果如图6(i)所示。

图7(a)所示的4类典型立体线框模型用本文算法均作出了正确表面识别如图7(b)所示。文献[6]的方法不能适用于图7(a)模型1、2所示的这两类立体。文献[5]方法不能正确识别图7(a)模型4所示类型立体的表面。

图7(a)所示的4类典型立体线框模型用本文算法均作出了正确表面识别如图7(b)所示。文献[6]的方法不能适用于图7(a)模型1、2所示的这两类立体。文献[5]方法不能正确识别图7(a)模型4所示类型立体的表面。

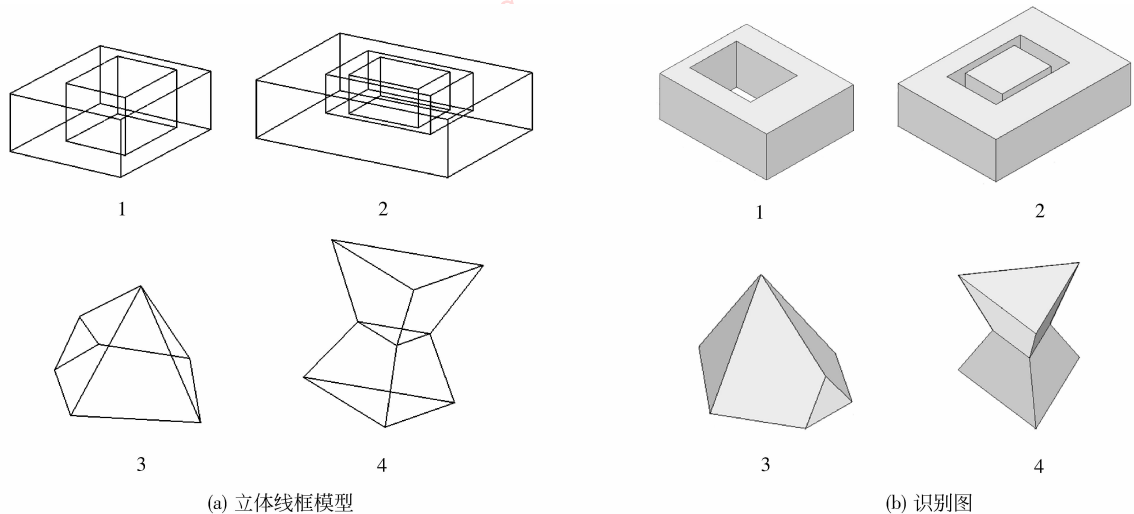


图7 算例2
Fig.7 Example 2

整个算法过程中除第2节第3)步其时间复杂度为 $O(n^2)$ 外,其余步骤均为 $O(n)$ 或 $O(1)$,因此整个算法的时间复杂度为 $O(n^2)$ 。本文方法在MATLAB环境中进行了大量的测试,实验结果表明,算法是高效鲁棒的。如图8(a)所示的立体包含40个顶点,60条棱线,22个表面,其投影图中存在2 097 151条回

路。而在本文搜索过程中通过5轮搜索仅仅搜索出了29个最小回路,节省了其他搜索算法中产生大量冗余回路所需真假面决策的运算时间。在相同实验条件下(计算机配置P4 1.6 GHz CPU,1 GB内存),本文方法与最近的文献[11]方法分别对图8所示4个模型进行了表面识别,用时比较见表1。

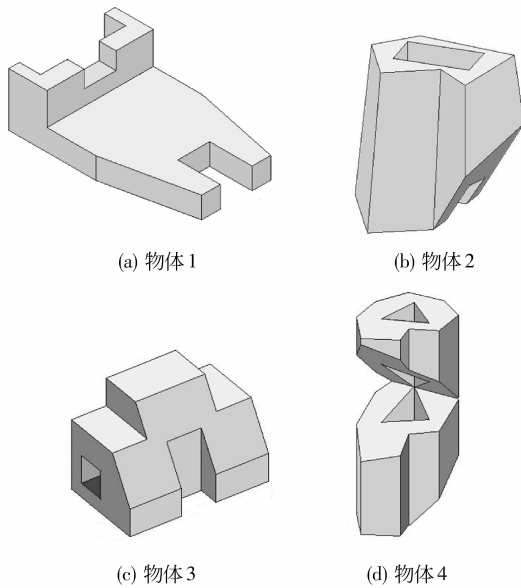


图 8 算例 3

Fig. 8 Example 3

表 1 表面识别用时比较

Tab. 1 Compare times two methods have spend in identifying face

被识别模型	文献[11]方法	本文方法
图 8(a)	626	130
图 8(b)	752	153
图 8(c)	684	142
图 8(d)	1 421	195

4 结 论

给出平面体线框模型表面识别的方法,综合利用了线框模型包含的几何信息和拓扑信息,通过投影将在 3 维空间中的搜索问题转化到 2 维平面上进行。只搜索最可能代表立体表面的可见最小回路,降低了算法的空间复杂度。算例表明,本文方法具有很广的立体类型适应性和较高的效率。后期将在此基础上继续研究包含曲线棱线的立体线框模型表面识别。

参考文献 (References)

[1] Chu Jun, Gao Mantun, Chen Guoding. On making interpretation

of line drawing easier and more precise in computer vision and CAD [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2004, 22(1): 84-87. [储琨, 高满屯, 陈国定. 从单幅透视线图建立平面立体的模型 [J]. 西北工业大学学报, 2004, 22(1): 84-87.]

[2] Cicek A. Reconstruction of 3D models from 2D orthographic views using solid extrusion and revolution [J]. Materials Processing Technology, 2004, 152(3): 291-298.

[3] Zhang Aijun, Zhu Changqian. Reconstruction of wire-frame model from orthographic views [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2001, 36(5): 540-544. [张爱军, 诸昌钎. 基于三视图的三维线框模型生成算法 [J]. 西南交通大学学报, 2001, 36(5): 540-544.]

[4] Markowsky G, Wesley M A. Fleshing out wire frames [J]. IBM Journal of Research and Development, 1980, 24(5): 582-597.

[5] Courter S M, Brewer J A. Automated conversion of curvilinear wire-frame models to surface boundary models: a topological approach [J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1986, 20(4): 171-178.

[6] Hanrahan P M. Creating volume models from edge-vertex graphs [J]. Computer Graphics, 1982, 16(3): 77-84.

[7] Agarwal S C, Waggenspack W N. Decomposition method for extracting face topologies from wireframe models [J]. Computer-Aided Design, 1992, 24(3): 123-140.

[8] Liu Jianzhuang, Lee Y T. A graph-based method for face identification from a single 2D line drawing [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(10): 1106-1119.

[9] Liu Jianzhuang. Evolutionary search for faces from line drawings [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(6): 861-872.

[10] Liu Shixie, Hu Shimin, Chen Yujian, et al. Reconstruction of curved solids from engineering drawings [J]. Computer Aided Design, 2001, 33(14): 1059-1072.

[11] Liu Shixia. Reconstruction of Curved Solids from Three Orthographic Views [D]. Beijing: Tsinghua University, 2002. [刘世霞. 基于三视图的曲面体重建技术的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2002.]

[12] Gong Jiehui. Studies on Solid Reconstruction from Engineering Drawings [D]. Beijing: Tsinghua University, 2006. [龚洁晖. 由工程图重建三维形体算法的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2006.]

[13] Qing Wenyan, Chen C L P, Tang Zesheng. Efficient algorithm for the reconstruction of 3D objects from orthographic projections [J]. Computer Aided Design, 1994, 26(9): 699-717.

[14] Hojnicky J S, White P R. Converting CAD wireframe data to surfaced representations [J]. Computers in Mechanical Engineering, 1988, 6(5): 19-25.